補光對設施番椒生產之影響

李睿家、陳宗禮
國立中興大學農藝學系

一、摘要

本研究以番椒(*Capsicum annuum* L.)作為材料，利用 LED 燈進行補充光量處理，探討不同補光模式對番椒植株生長、形態發育、生理特性、碳水化合物含量和果實產量品質之影響，探討台灣地區設施栽培高莖作物補光之可行性。頂端補光對植株株高、節間長、葉片發育、中下位葉光合作用特性、果實產量和品質無顯著差異。在水平冠層光照補充 300 µmol m^{-2} s^{-1} 能提高彩色甜椒可販售果產量。利用鋁箔鋪面能提高彩色甜椒下位葉葉綠素含量。頂端補光和鋁箔鋪面反射光照處理對番椒植株生長、形態發育、生理特性、碳水化合物含量和果實產量品質之影響並無顯著差異。此結果顯示，台灣地區網室高密度栽培番椒，補光並非經濟可行方式。

關鍵字：補光、LED、番椒、產量

二、前言

台灣位處於亞熱帶地區，氣候溫暖，雨量充足，適合作物生長，但降雨時期集中，易導致農作物災損，因此部分作物由露地栽培轉為設施栽培。除降雨外作物在露地栽培還會遭受颱風和寒害等氣候干擾，也會因病蟲害而使產量和品質下降。設施栽培，係指利用人工建築或設備達控制環境之目的，以提高作物品質、穩定生產和產期調節之功效。在台灣可耕地面積約有 579,196 公頃，其中約有 5.2%為設施栽培。但在長期設施栽培中會使土壤劣化、產生連作障礙和土壤病蟲害，可利用介質養液耕改善。此外隔雨資材影響到陽光穿透能力，使光量減弱和光質改變，可利用人工光源補充光照。光為植物唯一的能量來源，影響作物生長發育及光合作用。除了完全仰賴人工光源的植物工場之外，其餘的設施栽培仍需要依賴太陽光做為植物能源的供給，在高緯度地區會因冬季日照量不足，使植物光量降低。在光照失衡的環境下植株便無法正常生長，光照不足使得植物徒長、葉面積增大、葉片變薄等，藉由補充人工光源則可緩解光照不足的情況，而光照過強同樣影響植物生長，如光氧化逆境等，適當遮蔭可以解決此問題，因此設施內的光源管理成為最重要的一個環節。

光是植物生長唯一能量來源，光影響植物可分為三種：光強度(light intensity)、光質(light quality)及光照時間(light duration)。植物中許多的生理過程皆會受到光強度

的影響，光強度的影響分為強光及弱光。強光會導致葉片光合結構的氧化損傷，使葉片白化或黃化(Mullineaux and Karpinski, 2002)，因此會藉由減少光合作用反應中心的數量、氣孔型態的改變、葉片的捲曲和改變葉片或全株的型態減少強光傷害。當植株生長於弱光環境條件下時會造成植株高度增加、節間伸長和葉片面積增大。在遭受環境低光量時，可以藉由人工光源供給植物所需之光強度，此一過程可稱之為補光。近年來，隨著 LED 燈興起，具有省電、演色性佳和餘熱低等優點，補光由過去高鈉燈，逐漸轉換為頂端 LED 燈或植冠間 LED 燈光照等模式。利用 LED 燈補光能在萵苣生菜生產減少葉菜中硝酸鹽含量並提高地上部鮮重(Ioslovich, 2009)。增加溫室番茄和黃瓜光合作用速率、果數及產量(Deram et al., 2014；Pettersen et al., 2010)。補光延緩豇豆葉片老化(Frantz *et al*., 2000)，補充光能提高番茄果實抗壞血酸含量、改變葉片型態，提高葉片澱粉粒和可溶性糖、提高單位面積氣孔數並降低罹病葉片數(Liu *et al*., 2011a,b；Xu *et al*., 2012)。

甜椒(*Capsicum annuum* L.)為番椒屬眾多物種中，最重要的物種，其包括商業栽培上的全部甜椒品種及大部分辣椒品種(郭，2000)。其中甜椒為辣椒之變種，果實中不具辣椒素(capsaicin)。原產於中南美洲，台灣約至民國 40 年才開始普遍栽培甜椒，早期主要以青椒為主，經選拔育種後，逐漸產生紅、黃、橘及紫色之果色不同之品種。

甜椒喜好暖涼氣候，發育適溫 21~27℃。但當溫度高於 32℃容易落花、結果不良；低於 15℃則會花柱殘留，易形成畸形果(李，2005)。台灣地區主要栽培品種有金莎、金華星和紅麗星等。甜椒富含抗壞血酸及維生素 B2，根據 FAO 2013 年統計資料，番椒屬在全球栽培面積 48.2 萬公頃，產量達 47.3 萬公噸，主要栽培國家為越南、印尼及印度。台灣甜椒栽培面積為 2,498 公頃，總產量為 2.7 萬公噸，主要栽培縣市為南投縣、嘉義縣及雲林縣(台灣農業統計年報，2014)。

甜椒枝幹木質化程度較番茄大，其分枝形成力較弱，但因甜椒花朵著生葉腋，如未進行整枝易使養分流入導致側枝發育，故在栽培上仍會對其進行整枝。甜椒整枝可分為單幹整枝、雙幹整枝和不整枝栽培。單幹整枝是在植株開始分叉後，選擇較強壯分枝，保持單一主幹，其餘側枝皆剪除，能提高果實品質及大果比率；雙幹整枝則是在主幹生長至第 10 節，開始產生第一次分枝時留兩枝幹為雙主幹，之後在每一分叉節位留較強壯的一芽，能提高單果重；不整枝，在第一次分叉後保留所有側芽，通常會形成 3-4 主幹，雖產量高但其單果重較輕。單幹整枝和雙幹整枝主要以垂直網支持，並用結束帶固定枝條，不整枝植株則以兩層平行網固定維持植株生長。

本研究以網室內常種植之高莖作物甜椒為材料，利用透明塑膠浪板為建材的網室做為試驗基地，除自然日照外，以 LED 燈做為補充光源，比較不同補光對甜椒葉片發育、葉綠素含量、光合作用特性和葉片可溶性醣及澱粉含量，調查其產量和品質，以評估台灣網室栽培甜椒應用補光之可行性。

三、材料與方法

3.1 試驗材料

1、補光試驗材料

選用青椒‘翠綠’和彩色種(混合品種)，種子皆購農友種苗公司。種子以臭氧水浸種消毒 30 分鐘，洗淨之後浸潤 10 至 12 小時，保濕置於 4 - 6℃低溫處理 1 天，並以暗處理 2 天，將種子栽種於穴苗盤中，將其置於室外光照充足之處，待植株開始萌發，至第二葉本葉完全伸展方可移置網室栽培。栽種共有 4 品種，補光及未補光 2 處理，每處理有 3 重複，每重複種植 3 株，以隨機完全區集設計排列。

2、補光和鋪面處理試驗材料

選用甜椒彩色種‘金莎’ (SPY-175)，購自和生種苗公司。種子處理先將甜椒種子會先將其浸泡於水中 30℃，以磁石連續攪拌 2 小時後，其他處理與 1 相同。每品種 3 種處理，每處理 3 重複，每重複種植 8 株，以隨機完全區集設計排列。

3.2 養液滴灌試驗

使用市售 70 公升之培養土(002C, Jiffy Co.)進行養液袋耕，水分供給以塑膠水桶搭配計時器控指電磁閥和抽水馬達控制灌溉量，並利用滴劍作為單株滴灌模式。養液配方依據 Hoagland *et al*. (1950)修改而來，由 A 和 B 兩配方混和，養液 A 主要包括硝酸鈣($Ca(NO_3)_2.4H_2O$)、硝酸鉀(KNO_3)、硝酸銨(NH_4NO_3)、螯合鐵(Fe-EDTA)等，養液 B 供應包括硫酸鉀(K_2SO_4)、硫酸鎂($MgSO_4.7H_2O$)、磷酸二氫鉀(KH_2PO_4)、硫酸錳($MnSO_4.H_2O$)、硫酸鋅($ZnSO4.7H_2O$)、硼酸(H_3BO_3)、硫酸銅($CuSO_4.5H_2O$)、鉬酸($NaMoO_4.2H_2O$)等，因網室之地下水過鹼，需利用硫酸溶液，調節養液 pH 值，使其養液 pH 值維持至 6~7 間。根據作物生長時期之不同，以滴灌系統進行養液供給，在移植後 0-2 週供給半量養液，EC 值為 1.0 ms cm-1，每日供給約 250 ml；在 2-6 週供給全量養液，EC 值為 1.8 ms cm-1，養液每日分為 8 時段供給。

3.3 補光和鋪面處理試驗設計

種植兩行，甜椒一側為青椒，另一側為彩色甜椒。每品種種植 6 包培養土，每包培養土為一小區共種植三株，行株距為 60×22 cm 共計 24 包。採雙幹整之，在第一次分枝時選兩較粗壯分枝為雙幹，並移除 15 節位下之側枝，15 節位後每桿存留兩側枝繼續生長，並利用塑膠棒作為支撐。自移植 2 週後架設 LED 燈，LED 燈長約 145 cm，單管 LED 燈最高光強度為 400 μmol m^{-2} s^{-1}；雙管 LED 燈最高光強度為 650 μmol m^{-2} s^{-1}。以角鋼搭設長方形補光架，以雙管 LED 燈在青椒及彩色甜椒進行頂光處理(Top-SL)，在距離甜椒植株 10 cm，光量為 300 μmol m^{-2} s^{-1}。

補光和鋪面處理共種植 6 行，每兩行為一大區，每大區內以 4 包培養土為一小區，每小區間隔 30 cm。每包培養土種植 2 株，行株距為 70×40 cm。以鋼索及鋞管在溫室內搭建斜面 A 字型栽培架，採雙幹整枝，利用栽培網和結束機將植株固定在網上。在番茄於第一朵花下選擇側芽作為第三桿，甜椒在第一次分枝時選其中兩較粗壯為雙

幹,每週移除多於側芽。自移植 3 週後在網室內搭建鋼索架設 LED 燈進行補光處理，並利用可活動式繩結調節 LED 燈之位置，將 LED 燈維持於植株上方 10 cm 處，光量為 300 μmol m^{-2} s^{-1}，自早上 6:00 至 8:00 及傍晚 16:00 至 18:00，早晚光照 2 小時。將銀黑布和鋁箔之亮面朝上黏貼至培養土袋外層，以提高 LED 燈及陽光之反射光。依其處理可分為 a.未補光處理(No-SL)，b.早晚補頂光 2 小時搭配銀黑布鋪面(SL+PE)，c.早晚補頂光 2 小時搭配鋁箔鋪面(SL+AF)。

3.4 生長發育特性調查

葉部發育調查，葉面積利用平台式掃描器(HP photosmart 5520)將葉片平鋪，以解析度 300 dpi，A4，黑白影像掃描，再利用影像分析軟體(image j)測量葉面積。葉面積指數以植冠分析儀(LAI-2000, Li-Co, USA)，測量植冠上(A 值)和底層(B 值)，以附屬軟體計算讀值。葉柄長使用測微尺測量葉序第一片葉片基部至莖部節位上。葉長和葉寬用測微尺測量葉序第一片葉葉基至葉尖和葉片最寬處。葉厚以厚度計(Mitutoyo)選擇無明顯葉脈處測量葉序第一片葉。葉色值(SPAD-valu):以葉綠素計(SPAD-520, Konica Minolta, Japan)夾取讀值。

生長與生物量分析，株高由介質表面至植株最高點之距。節間長將莖部節間剪斷後，使用測微尺測量。節間重將莖部節間剪斷後，以微量電子秤秤取。節間比重將節間重除以節間長，以代表節間的粗細。莖徑使用電子式測微尺(Mitutoyo)測量莖基部最大之寬度。植株鮮重將植株由莖基部切離，取其地上部全株秤取鮮重。植株乾重將採收後植株放入牛皮紙袋中,先以烘箱 100℃乾燥 1 小時,再以 70℃乾燥 48 小時後，秤取乾重。複合健苗指數:第一節節間比重÷株高×地上部鮮重。

果實特性分析，果實長與寬用測微尺測量果蒂至果尖為果長；以赤道線為果寬。硬度利用推拉力計(RX-100, AIKOH, Japan)之圓錐形探頭，每顆果實測量赤道線上三點加以平均代表每個果實之硬度，單位為 k gf。果肉厚度將果實縱向剖開，使用電子式測微尺(Mitutoyo)測量果實赤道線上 2 點並平均。可溶性固形物(%)使用攜帶式折射糖度計(MASTER-M, ATAGO, Japan)測量番茄每一花序前三顆成熟之果實。

3.5 生理特性與成份分析

包括葉綠素含量與比率、葉綠素螢光、Fv/Fm 比值、光合作用速率、蒸散作用速率、光譜分布、直/散射光測定、光反應曲線等、葉綠素含量、可溶性碳水化合物含量、澱粉含量。光合作用參數測定，自植株頂端選取第 5 片葉為上位葉，選取第 13 片葉為中位葉，第 20 片葉為下位葉。以氣體交換系統(Gas exchange system, LI-6400, Li-Co, USA)作為試驗使用之儀器，測定前先需暖機 30 分鐘，待其穩定後進行流速與 IRGA 歸零。以網室內光度和二氧化碳濃度直接測量，每片葉夾取 2 分鐘，等其數值穩定後記錄。

3.6 統計方式

利用統計軟體 SPSS（statistical product and service solutions, SPSS）進行 Student's t-test，比較補光與未補光之差異。另外以統計軟體 R 以最小顯著差異測驗法(Fisher’s least significant difference method, LSD)分析，比較試驗中不同補光處理與未補光處理間的差異。

四、結果與討論

4.1 補光對番椒生產之影響

欲了解長期補光對植株之影響，以青椒和彩色甜椒為材料，將兩種作物栽培於網室內，以白光 LED 燈進行補光，時間在早上 6:00 至下午 18:00，補光處理的方式利用在植株頂部利用 LED 光源進行頂端補光。

調查植株中位葉葉片葉柄長、葉長、葉寬、葉厚和 SPAD 值，結果如表 1 所示，以及觀察植株中位葉在補光處理下葉綠素含量之變化，結果如表 2 所示，青椒在頂端補光處理之各葉片性狀均與未補光處理無顯著差異。甜椒在頂端補光之葉柄長 3.5 cm 顯著較未補光處理 5.8 cm 為低 ($p < 0.05$)。青椒在補光和未補光處理下，葉綠素 a、葉綠素 b 和總葉綠素含量無顯著差異，葉綠素 a/b 比值為 1.2 和 1.3。彩色甜椒在補光和未補光處理下，葉綠素 a、葉綠素 b 和總葉綠素含量無顯著差異，葉綠素 a/b 比值為 1.4 和 1.4。

表 1、頂光補光處理對溫室栽培番椒中位葉之影響

Species	Treatment[z]	Petiole length (cm)	Terminal leaflet length (cm)	Terminal leaflet width (cm)	Leaf thickness (mm)	SPAD value
Green pepper	No-SL	5.0±0.9	16.9±5.8	10.0±2.0	0.23±0.04	51.3±2.7
	Top-SL	3.4±0.8	12.5±2.1	8.2±1.1	0.26±0.03	49.8±3.1
Sweet pepper	No-SL	5.8±0.6	16.4±3.5	9.8±0.9	0.21±0.01	48.2±2.9
	Top-SL	3.5±0.4*	11.5±3.0	7.5±2.8	0.28±0.01	53.5±3.7

No-SL:無補光；Top-SL:頂光補光處理。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

表 2、頂光補光處理對溫室栽培番椒中位葉之葉綠素含量影響

Species	Treatment[z]	Chlorophyll a (mg g-1 FW)	Chlorophyll b (mg g-1 FW)	Total chlorophyll (mg g-1 FW)	Chlorophyll a/b ratio
Green pepper	No-SL	1.2±0.1	1.0±0.1	2.3±0.2	1.2±0.2
	Top-SL	1.3±0.2	1.0±0.1	2.3±0.2	1.3±0.2
Sweet pepper	No-SL	1.4±0.2	1.2±0.2	2.5±0.3	1.4±0.3
	Top-SL	1.4±0.1	1.1±0.1	2.6±0.2	1.4±0.1

No-SL:無補光；Top-SL:頂光補光處理。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

在下午 16:00 至 18:00 測量不同葉位葉片光合作用速率、氣孔導度和蒸散作用速率，結果如表 3 所示。青椒上位葉光合作用速率為 5.5 μmol m^{-2} s^{-1} 顯著高於未補光處理 0.3 μmol m^{-2} s^{-1}，上位葉蒸散作用速率 0.8 μmol m^{-2} s^{-1} 顯著低於 1.7 μmol m^{-2} s^{-1}($p < 0.05$)，其餘性狀無顯著差異。彩色甜椒上位葉光合作用速率 2.9 μmol m^{-2} s^{-1} 顯著高於未補光處理 0.8 μmol m^{-2} s^{-1} ($p < 0.05$)。

進一步觀察葉片光合產物累積之情形，結果如表 4 所示。青椒和甜椒可溶性醣和澱粉含量無顯著差異。補光處理較未補光處理可溶性醣和澱粉無顯著差異，但其趨勢較高。

表 3、頂光補光處理對溫室栽培番椒葉片光合參數之影響

Species	Treatment[z]	Photosynthetic rate (μmol CO_2 m^{-2} s^{-1})			Transpiration rate (μmol H_2O m^{-2} s^{-1})			Stomatal conductance (μmol H_2O m^{-2} s^{-1})		
		Upper	Middle	Lower	Upper	Middle	Lower	Upper	Middle	Lower
Green pepper	No-SL	0.9±1.4	0.8±0.6	0.8±0.7	1.7±0.4	2.0±0.3	1.3±0.6	80.3±20.1	91.3±20.1	52.1±27.0
	Top-SL	5.5±1.1*	0.9±0.7	1.0±0.9	0.8±0.1*	1.8±0.5	1.0±0.5	73.8±59.2	68.7±45.8	30.7±12.4
Sweet pepper	No-SL	0.8±0.5	0.6±0.3	0.4±0.2	0.8±0.3	0.3±0.2	0.4±0.3	33.3±9.0	15.7±9.5	17.2±15.7
	Top-SL	2.9±1.5*	0.3±0.3	0.3±0.3	1.2±0.2	0.3±0.2	0.3±0.2	45.7±10.8	17.0±11.2	12.4±4.3

No-SL:無補光；Top-SL:頂光補光處理。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

表 4、頂光補光處理對溫室栽培番椒葉片碳水化合物含量之影響

Species	Treatment[z]	Sugar content (mg g^{-1} DW)	Starch content (mg g^{-1} DW)
Green pepper	No-SL	35.9±7.0	26.6±15.3
	Top-SL	46.4±6.3	61.9±35.3
Sweet pepper	No-SL	35.6±12.4	33.4±10.4
	Top-SL	31.3±1.7	41.6±10.6

No-SL:無補光；Top-SL:頂光補光處理。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

調查植株始花日期、果實初收穫日和結果率，結果如表 5 所示。青椒和彩色甜椒補光與未補光處理在始花日期、果實初收穫日和結果率皆無顯著差異。調查果實產量、果數、平均果重、品質性狀，果長、果寬、可溶性物質含量、滴定酸和甜酸比，結果如表 6 所示。青椒產量部分，未補光處理為 381.2 g，在頂端補光為 663.2 g，青椒產量、果數和平均果重皆無顯著差異。彩色甜椒在產量部分，未補光處理為 472.6 g；在頂端補光為 438.9 g。彩色甜椒產量、果數和平均果重皆無顯著差異；在青椒可溶性固形物含量，在未補光處理為 7.9 °Brix，頂端補光處理為 6.6 °Brix，青椒果長、果寬、可溶性固形物含量和滴定酸在頂端補光和未補光處理間無顯著差異。在彩色甜椒可溶性固形物含量，在未補光處理為 7.8 °Brix，頂端補光處理為 8.1 °Brix，青椒果長、果寬和可溶性固形物含量在頂端補光和未補光處理間無顯著差異。根據重量和外觀將果實分為大果、中果、小果和不可販售果，結果如表 7 所示。青椒分級中並未達到大果和中果，小果數和不可販售果數在處理間無顯著差異。彩色甜椒分級中並未達到大果，中果數、小果數和不可販售果數在處理間無顯著差異。

表 5、頂光補光處理對溫室栽培番椒生長日數之影響

Species	Treatment[z]	First flowering day	First harvest day	Fruit rate
Green pepper	No-SL	41.9±4.9	113.3±6.9	7.9±6.2
	Top-SL	42.3±3.6	111.9±7.2	12.4±6.2
Sweet pepper	No-SL	42.6±4.1	112.3±8.3	12.3±6.8
	Top-SL	43.9±2.9	113.2±4.8	10.8±6.2

No-SL:無補光；Top-SL:頂光補光處理。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

表 6、頂光補光處理對溫室栽培番椒之產量與品質之影響

Species	Treatment[z]	Yield (g plant^{-1})	Fruit number	Fruit weight (g)	Fruit length (mm)	Fruit width (mm)	TSS[y] (°Brix)
Green pepper	No-SL	381.9±72.5	5.3±1.8	74.6±11.3	115.0±14.7	43.5±6.9	7.9±0.6
	Top-SL	663.2±231.2	10.8±5.3	64.2±10.2	122.9±7.1	32.5±2.6	6.6±0.4
Sweet pepper	No-SL	438.9±75.0	5.0±0.7	87.6±2.6	89.1±5.9	52.4±7.1	7.8±0.7
	Top-SL	472.6±62.7	6.5±0.7	70.3±8.7	71.7±9.4	56.3±3.8	8.1±1.1

No-SL:無補光；Top-SL:頂光補光處理；TSS:可溶性物質含量；TA:滴定酸和甜酸比。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

表 7、頂光補光處理對溫室栽培番椒果實分級之影響

Species	Treatment[z]	M-fruit number	%	S-fruit number	%	unmarketable fruit number	%
Green pepper	No-SL	-	-	1.0±0.8	17	5.0±2.2	83
	Top-SL	-	-	0.3±0.5	2	11.8±6.0	98
Sweet pepper	No-SL	0.5±0.6	10	1.5±1.7	30	3.0±2.6	60
	Top-SL	0.5±1.0	8	0.3±0.5	3	5.8±3.4	89

No-SL:無補光； Top-SL: 頂光補光處理。果實分級方式依據台北農產運銷有限公司(http://www.tapmc.com.taipei/market2.html). 番椒: 大果(L-fruit) > 300 g；中果(M-fruit) 300~200 g；小果(S-fruit) 200~100 g；無法販售(unmarketable-fruit) < 100 g 或是受傷生病果實。每處理三重複。*表示處理組與控制組具顯著差異 $p < 0.05$.

4.2 補光和鋪面處理對彩色甜椒生產之影響

為提高網室光能利用效率，在初春至夏初種植彩色甜椒，利用白光 LED 燈分別在上午 6:00-8:00 和下午 16:00-18:00 兩時段進行補光，並以銀黑布及鋁箔紙作為鋪面，以期能提高反射光，影響下位葉光量。

葉片是吸收光線之重要器官，為了解補光及鋪面對葉片發育之影響，測量彩色甜椒中位葉葉部形態特徵，包括總葉長、葉厚、SPAD 及葉面積指數。結果顯示表 8 所示，總葉長、葉厚、SPAD 值和葉面積指數皆無顯著差異。

比較上、中和下位葉葉片葉綠素 a、b、總葉綠素含量和 a/b 比值，結果如表 9 所示。葉綠素 a 最大值為 2.1 mg g^{-1} FW 、最小值為 1.3 mg g^{-1} FW；葉綠素 b 最大值為 1.3 mg g^{-1} FW、最小值 1.1 mg g^{-1} FW；總葉綠素含量最大值 3.4 mg g^{-1} FW、最小值為 2.4 mg g^{-1} FW；a/b 比值最大值為 1.6 mg g^{-1} FW、最小值為 1.2 mg g^{-1} FW，上位葉葉綠素 a、b、總葉綠素含量和 a/b 比值在各處理間無顯著差異。在中位葉部分，葉綠素 a 和總葉綠素含量，以補光加鋁箔最高，含量為 1.3 mg g^{-1} FW 和 2.2 mg g^{-1} FW，而未補光處理最低，葉綠素 a 和總葉綠素含量為 0.7 mg g^{-1} FW 和 1.5 mg g^{-1} FW。在下位葉也有類似情形，葉綠素 a 和總葉綠素含量，以補光加鋁箔最高，含量為 0.9 mg g^{-1} FW 和 1.5 mg g^{-1} FW，而未補光處理最低，葉綠素 a 和總葉綠素含量為 0.6 mg g^{-1} FW 和 1.1 mg g^{-1} FW。中下位葉葉綠素 b 含量在各處理間無顯著差異

表 8、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒中位葉之影響

Species	Treatment[z]	Leaf length (cm)	Leaf thickness (mm)	SPAD value	LAI
Sweet pepper	No-SL	30.2±2.9a	0.34±0.07a	52.6±4.3a	1.8±0.5a
	SL+PE	27.4±3.2a	0.33±0.02a	53.2±2.8a	1.8±0.4a
	SL+AF	29.9±2.8a	0.31±0.05a	51.7±3.6a	1.9±0.4a

No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。每列具相同字母表示差異不超過 5%，使用 Fisher's protected LSD test.

表 9、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒葉片葉綠素含量之影響

Species	Treatment	Chlorophyll a (mg g^{-1} FW)			Chlorophyll b (mg g^{-1} FW)			Total chlorophyll (mg g^{-1} FW)			Chlorophyll a/b ratio		
		U[y]	M	L	U	M	L	U	M	L	U	M	L
Sweet pepper	No-SL	1.3±0.1a	0.7±0.1b	0.6±0.1b	1.1±0.1a	0.8±0.1a	0.6±0.1a	2.4±0.4a	1.5±0.1b	1.1±0.1b	1.2±0.2a	0.9±0.1a	1.0±0.1a
	SL+PE	1.6±0.7a	1.0±0.1ab	0.7±0.1b	1.2±0.3a	0.9±0.1a	0.6±0.1a	2.8±1.0a	1.9±0.2ab	1.3±0.1ab	1.4±0.3a	1.1±0.2a	1.1±0.1a
	SL+AF	2.1±1.1a	1.3±0.3a	0.8±0.1a	1.3±0.3a	0.9±0.1a	0.7±0.1a	3.4±1.4a	2.2±0.4a	1.5 ±0.2a	1.6±0.5a	1.4±0.2a	1.3±0.1a

No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。每列具相同字母表示差異不超過 5%，使用 Fisher's protected LSD test.

了解補光對植株葉部型態及葉綠素含量之影響後，利用光合作用儀在中午 10:00-12:30 測量網室內小彩色甜椒光合作用特性，包括葉片光量、光合作用速率、胞間二氧化碳濃度、氣孔導度和蒸散速率，結果如表 10 所示。彩色甜椒上位葉光量在未補光、補光加銀黑布和補光加鋁箔處理分別為 496.3 μmol m^{-2} s^{-1} 、478.3 μmol m^{-2} s^{-1} 和 458.9 μmol m^{-2} s^{-1}，光合作用速率分別為 8.2 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}、7.6 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} 和 8.4 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}，上位葉光合作用特性在各處理間無顯著差異。中位葉光量在未補光、補光加銀黑布和補光加鋁箔處理分別為 291.3 μmol m^{-2} s^{-1}、243.8 μmol m^{-2} s^{-1} 和 289.1 μmol m^{-2} s^{-1}，光量衰減情形分別為 41 % 、49 % 和 37 % ，光合作用速率分別為 5.4 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}、4.7 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} 和 5.3 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}，中位葉光合作用特性在各處理間無顯著差異。下位葉光量在未補光、補光加銀黑布和補光加鋁箔處理分別為 182.4 μmol m^{-2} s^{-1}、173.3 μmol m^{-2} s^{-1} 和 169.2 μmol m^{-2} s^{-1}，光量衰減情形分別為 63 % 、64 % 和 63 % ，光合作用速率分別為 3.3 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}、3.0 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1} 和 3.7 μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}，下位葉光合作用特性各在處理間無顯著差異。

結果顯示，不同鋪面及早晚補光無法影響中午植株之光合作用。彩色甜椒之光合作用光量、光合作用速率、胞間二氧化碳濃度、氣孔導度和蒸散作用速率在不同葉位間無顯著差異。

表 10、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒葉片光合參數之影響

Species	Treatment[z]	PPFD ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)			Photosynthetic rate ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)			Intercellular CO_2 concentration ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)			Stomatal conductance ($\mu mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$)			Transpiration rate ($\mu mol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$)		
		U[y]	M	L	U	M	L	U	M	L	U	M	L	U	M	L
Sweet pepper	No-SL	496.3± 163.2 a	291.7± 77.9 a	182.4± 69.8 a	8.2±4.2 a	5.4±3.2 a	3.3±2.3 a	246.2± 32.6 a	279.1± 35.6 a	312.0± 45.2 a	132.7± 41.3 a	116.9± 52.3 a	98.9± 45.3 a	4.3±2.1 a	2.1±1.1 a	1.4±1.0 a
	SL+PE	478.3± 202.1 a	243.8± 101.2 a	173.3± 79.2 a	7.6±3.9 a	4.7±2.9 a	3.0±2.7 a	232.9± 27.8 a	292.8± 33.9 a	301.1± 62.3 a	122.3± 65.5 a	99.6± 46.2 a	99.6± 53.2 a	3.2±1.7 a	2.5±1.3 a	2.0±1.1 a
	SL+AF	458.9± 178.2 a	289.1± 110.3 a	169.2± 98.4 a	8.4±4.4 a	5.3±3.5 a	3.7±3.0 a	241.2± 26.3 a	267.6± 24.5 a	286.3± 43.6 a	107.9± 42.6 a	93.3± 52.6 a	102.6± 68.2 a	5.0±1.9 a	2.3±0.9 a	2.0±1.3 a

No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。每列具相同字母表示差異不超過 5%，使用 Fisher’s protected LSD test.

不同鋪面處理對中午測量之光合作用速率無顯著影響，進一步分析補光及鋪面處理對彩色甜椒葉片可溶性糖及澱粉含量之影響，結果如圖 1 所示。彩色甜椒可溶性醣含量未補光處理其上位葉、中位葉及下位葉，分別為 65.1 mg g^{-1} DW、62.0 mg g^{-1} DW 和 58.2 mg g^{-1} DW；頂端補光加銀黑布其上位葉、中位葉及下位葉，分別為 62.2 mg g^{-1} DW、59.8 mg g^{-1} DW 和 58.5 mg g^{-1} DW；頂端補光加鋁箔其上位葉、中位葉及下位葉，分別為 76.4 mg g^{-1} DW、58.8 mg g^{-1} DW 和 59.5 mg g^{-1} DW。彩色甜椒澱粉含量未補光處理上位葉、中位葉及下位葉，分別為 117.6 mg g^{-1} DW、102.6 mg g^{-1} DW 和 84.6 mg g^{-1} DW；頂端補光加銀黑布上位葉、中位葉及下位葉，分別為 80.0 mg g^{-1} DW、87.4 mg g^{-1} DW 和 65.2 mg g^{-1} DW；頂端補光加鋁箔上位葉、中位葉及下位葉，分別為 113.8 mg g^{-1} DW、93.1 mg g^{-1} DW 和 79.5 mg g^{-1} DW。在所有處理下，彩色甜椒上位葉可溶性醣含量顯著高於下位葉可溶性醣含量，特別在頂端補光加鋁箔鋪面處理上位葉有最高可溶性醣含量。在澱粉部分，未光處理和頂端補光加鋁箔處理，其上位葉澱粉含量顯著高於下位葉。

調查植物生長特性，包括株高、節間數和平均節間長如表 11 所示。彩色甜椒第 18 週株高在未補光、頂端補光加銀黑部和頂端補光加鋁箔分別為 161.0 cm、152.3 cm 和 163.8 cm；節間數為 31.0 個、31.3 個和 33.3 個；平均節間長為 5.2 cm、4.9 cm 和 4.9 cm。彩色甜椒之株高、節間數和平均節間長在各處理間無顯著差異。顯示頂端補光和鋪面處理並不能影響植株莖節之伸長。

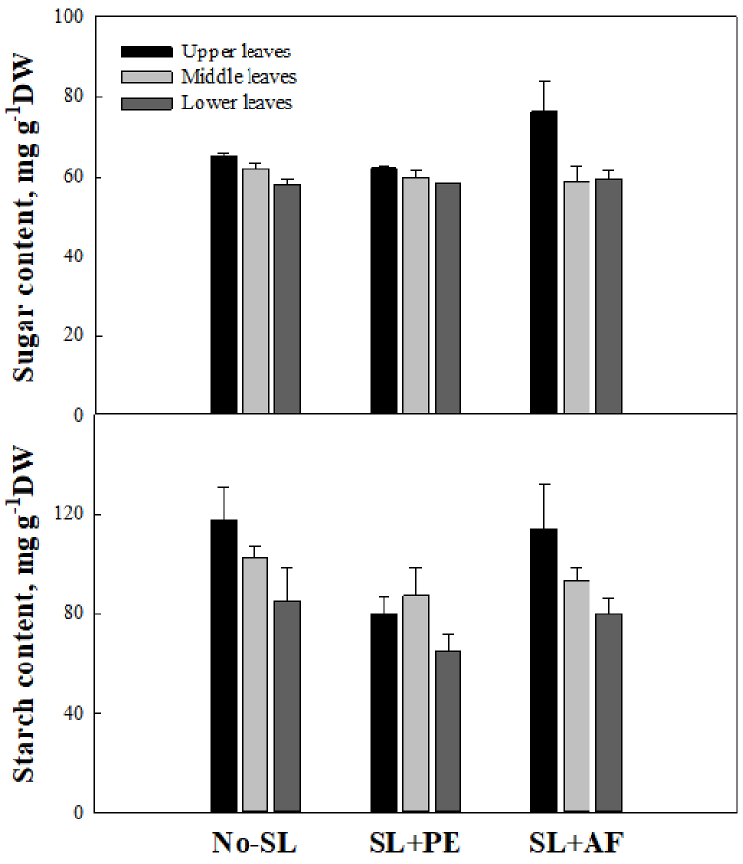

圖 1、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒碳水化合物含量之影響
No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。

表 11、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒生長特性之影響

Species	Treatment[z]	Plant height (cm)	Internode number	Average internode length (cm)
Sweet pepper	No-SL	161.0±11.2 a	31.0±3.3 a	5.2±0.3 a
	SL+PE	152.3±4.6 a	31.3±2.2 a	4.9±0.3 a
	SL+AF	163.8±7.1 a	33.3±1.2 a	4.9±0.3 a

No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。每列具相同字母表示差異不超過 5%，使用 Fisher’s protected LSD test.

調查彩色甜椒果實產量，結果如表 12 所示。彩色甜椒在未補光、補光加銀黑布和補光加鋁箔處理，其單株產量分別為 1139.3 g、 943.5 g 和 175.5 g，果實數分別為 7.0 個、5.8 個和 6.0 個，平均果重分別為 164.0 g、168.7 g 和 175.5 g，彩色甜椒單株產量、果數和平均果重在各處理間無顯著差異。調查採收後彩色甜椒果實品質，結果如表 13 所示彩色甜椒之果長、果寬、硬度、果厚和可溶性固形物在各處理間皆無顯著差異。

在田間鋁箔覆蓋與一般裸露土壤能提高作物產量，如番茄、玉米、辣椒、胡蘿蔔和黃瓜，並能降低蚜蟲病害(Greer and Dole, 2003)。施用鋪面對產量之影響有人認為可能與鋪面之反射光量有關，如 Loughrin and Kasperbauer (2001) 在種植甜羅勒時施用不同顏色之鋪面處理分別為黑、紅、綠、藍、黃和白，其所能反射之光量比例為 5%、12%、11%、13%、32%和 40%，其中白色鋪面種植之植株有較佳的生物量；行間覆蓋白色鋪面與黑色相比有更高反光，能提升青椒可販售產量(Hutton and Handley, 2007)。但也有人認為土壤溫度影響較大，種植甜椒在銀黑布能較白色鋪面提高株高、徑圍和果實產量，其反射比例分別為 52%和 30%，根溫分別為 27.29℃和 27.95℃，顯示不同鋪面能影響根溫，進而影響產量(Díaz-Pérez, 2010)。

在本次試驗中利用了鋁箔和銀黑布鋪面處理，苗期測量時能反射約 25%的陽光直射光量。但在生長後期所量測之光場分析，下午補光進行時彩色甜椒銀黑布為 28 μmol m-2 s-1，而在鋁箔鋪面上方為 37 μmol m-2 s-1。在產量部分與過去文獻相比本次最高反射光量僅為 29%，而在栽培過程因上位葉擷取大量光量，使中下位葉之反射光量僅為更低，此可能是鋪面處理無顯著差異之原因。

綜合上述，彩色甜椒補光處理對生長發育無顯著影響。但彩色甜椒中下位葉總葉綠素含量在頂端補光加鋁箔處理下顯著高於未補光處理，而產量及品質在補光鋪面處理和未補光處理間無顯著差異。

表 12、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒產量之影響

Species	Treatment[z]	Yield (g plant^{-1})	Fruit number	Fruit weight (g)
Sweet pepper	No-SL	1139.3±88.9 a	7.0±1.0 a	164.0±11.6 a
	SL+PE	943.5±122.8 a	5.8±0.8 a	168.7±24.5 a
	SL+AF	1050.1±107.1 a	6.0±0.7 a	175.5±11.2 a

No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。每列具相同字母表示差異不超過 5%，使用 Fisher’s protected LSD test.

表 13、補光與鋪面處理對溫室栽培彩色甜椒果實品質之影響

Species	Treatment[z]	Fruit length (mm)	Fruit width (mm)	Hardness (kgf)	Peel thickness (mm)	TSS[y] (˚Brix)
Sweet pepper	No-SL	75.0±4.5 a	80.8±4.3 a	282.8±68.5 a	11.3±9.6 a	6.4±4.3 a
	SL+PE	76.0±5.9 a	76.6±9.0 a	271.6±69.2 a	11.6±9.5 a	6.3±2.9 a
	SL+AF	78.8±8.8 a	80.5±2.4 a	289.3±78.4 a	11.4±10.0 a	6.4±3.7 a

No-SL:無補光；SL+PE:頂光補光與銀黑部鋪面處理；SL+AF: 頂光補光與鋁箔紙每處理三重複。每列具相同字母表示差異不超過 5%，使用 Fisher’s protected LSD test.

五、結論

在清晨 6:00 至傍晚 18:00 利用頂端光照處理番椒，由於番椒其單一葉片葉面積片大，使上位葉截光率高達 90%，在下午提供上位葉補光時，頂端光照只能影響青椒和甜椒上位葉光合作用速率，但補光和未補光處理之葉片碳水化合物含量並無差異，顯示補光雖然能提升高莖作物局部之光量，但對整體植株之生長發育、生理特性似無顯著促進作用，因此頂端補光無法提升其產量和品質。

利用頂端光照結合鋪面反射光處理，結果顯示，早晚供給頂光兩小時的處理與未給光之植株，在其生長發育及果實產量並無顯著差異。在餘光反射部分，鋪設鋁箔和銀黑布之反射光並無顯著促進效果，其對植株生長發育、產量和品質並無影響。

目前在台灣若以 LED 進行高莖作物如番椒等之補光處理，受限於補充光源在高莖作物植冠的穿透度有限，僅在植物受光態中佔有一小部分，因此難以影響植株之生長發育及其產量，臺灣地區溫、網室高密度栽培番椒，補光並非經濟可行方式。

六、參考文獻

1. 行政院農委會。2014。台灣農業統計年報。http://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/official/OfficialInformation.aspx
2. 李美娟。2005。甜椒。台灣農家要覽農作篇二。533-536。
3. 郭孚耀。2000。甜椒栽培技術。臺中區農業改良場特刊第 45 號。
4. Demers, D. A., M. Dorais, C. H. Wien, and A. Gosselin. 1998a. Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersiconesculentum* Mill.) plants and fruit yields. Sci. Hortic. 74: 295–306.

5. Díaz-Pérez, J.C. 2010. Bell pepper (*Capsicum annum* L.) grown on plastic film mulches: effects on crop microenvironment, physiological attributes, and fruit yield. HortScience 45: 1196-204.
6. Frantz, J. M., R. J. Joly, and C. A. Mitchell. 2000. Intracanopy lighting influences radiation capture, productivity, and leaf senescence in cowpea canopies. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 125: 694-701.
7. Greer, L., and J. M. Dole. 2003. Aluminum foil, aluminium-painted, plastic, and degradable mulches increase yields and decrease insectvectored viral diseases of vegetables. Hortechnology 13: 276-284.
8. Hutton, M. G., and D. T. Handley. 2007. Effects of silver reflective mulch, white inter-row mulch, and plant density on yields of pepper in Maine. Hortechnology 17: 214-219.
9. Ioslovich, I. 2009. Optimal control strategy for greenhouse lettuce: Incorporating supplemental lighting. Biosyst. Eng. 103: 57-67.
10. Liu, H., B. Liu, C. Zhao, M. Pepper, and C. Lin. 2011. The action mechanisms of plant cryptochromes. Trends Plant Sci. 16: 684-691.
11. Liu, X. Y., S. R. Guo, Z. G. Xu, X. L. Jiao, and T. Takafumi. 2011. Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves, and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of light-emitting diodes. HortScience 46: 217-221.
12. Loughrin, J. H., and M. J. Kasperbauer. 2001. Light reflected from colored mulches affects aroma and phenol content of sweet basil (*Ocimumbasilicum*L.) leaves. J. Agric. Food Chem. 49: 1331-1335.
13. Mullineaux, P., and S. Karpinski. 2002. Signal transduction in response to excess light: getting out of the chloroplast. Curr. Opin. Plant Biol. 5: 43-48.
14. Pettersen, R. I., S. Torre, and H. R. Gislerod. 2010. Effects of intracanopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber. Sci. Hortic. 125: 77-81.
15. Xu, H. L., Q. Xu, F. Li, Y. Feng, F. Qin, and W. Fang. 2012. Applications of xerophytophysiology in plant production-LED blue light as a stimulus improved the tomato crop. Sci. Hortic. 148: 190-196.